

1. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М.: Машиностроение, 1982. С.182
2. Ендогур А.И, Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. М.: Машиностроение, 1986. С. 198

## **МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МНОГОФАЗНОГО СТРУЙНОГО АППАРАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ РАКЕТНОЙ КАМЕРЫ**

Первышин А.Н., Винокуров М.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Конверсионное использование опыта, накопленного при создании ракетных двигателей малой тяги открывает широкие перспективы совершенствования рабочего процесса технологических установок различного назначения. В частности, применение газогенератора на базе ракетной камеры в составе струйного аппарата существенно повышает его энергооборуженность и расширяет спектр решаемых технологических задач, к числу которых можно отнести резку, нанесение износостойких и коррозионно-стойких покрытий, струйно-абразивную обработку и ряд других.

Разработка такого струйного аппарата требует решения ряда специфических вопросов, обусловленных наличием высокотемпературной сверхзвуковой струи продуктов сгорания ракетного топлива в качестве активного рабочего тела, и многофазного пассивного рабочего тела в состав которого, в общем случае, входят сыпучий компонент (абразив, напыляемый материал и т.п.), жидкость (вода для пылегашения и теплозащиты газодинамического тракта) и транспортирующий газ.

Ниже рассмотрена модель рабочего процесса многофазного струйного аппарата технологической установки на базе ракетной камеры.

Вывод уравнений выполнен в рамках следующих основных допущений:

- все компоненты рабочего тела равномерно распределены по объему смеси и находятся в тепловом и механическом равновесии друг с другом;
- изменение состояния смеси не сопровождается химическими превращениями;
- весь жидкий компонент в пассивном рабочем теле находится в конденсированном состоянии и при смесеобразовании (с активным рабочим телом) испаряется полностью;

- физические константы компонентов смеси не зависят от температуры и давления.

Основные соотношения, отражающие связь между физическими константами и параметрами состояния рабочего тела струйного аппарата и его составляющих, полученные в рамках указанных допущений, приведены ниже.

## 1. Активное рабочее тело (продукты сгорания компонентов ракетного топлива)

### 1.1 Основные константы:

удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг\*К)

$$C_{p,a} = \frac{\alpha_{ок} Hu}{(\alpha_{ок} Km^{cm} + 1)(T_a^0 - T_{н.у})} \quad (\text{при } \alpha_{ок} < 1);$$

$$C_{p,a} = \frac{Hu}{(\alpha_{ок} Km^{cm} + 1)(T_a^0 - T_{н.у})} \quad (\text{при } \alpha_{ок} \geq 1);$$

газовая постоянная, Дж/(кг\*К)

$$R_a = R / \mu_a;$$

удельная изохорная теплоемкость, Дж/(кг\*К)

$$C_{v,a} = C_{p,a} - R_a;$$

показатель адиабаты

$$k_a = C_{p,a} / C_{v,a}.$$

Здесь  $Hu$ ,  $Km^{ст}$  и  $T_{н.у}$  - теплотворная способность, среднее массовое стехиометрическое соотношение и температура компонентов топлива соответственно;  $T_a^0$  и  $\mu_a$  - полная температура и молярная масса продуктов сгорания, рассчитанные по заданным значениям коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ок}$  и давления в камере сгорания  $P_a^0$  по методике [1].

### 1.2 Основные уравнения:

уравнение состояния

$$P_a = \rho_a R_a T_a;$$

уравнение адиабаты

$$P_a^0 / P_a = \left( T_a^0 / T_a \right)^{k_a / (k_a - 1)};$$

уравнение сохранения энергии

$$l_a = \frac{W_a^2}{2} = \frac{k_a}{k_a - 1} R_a T_a^0 \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_a^0} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} \right];$$

уравнение Майера

$$R_a = C_{p,a} - C_{v,a} = C_{p,a} (\bar{k}_a - 1) / \bar{k}_a;$$

соотношения для внутренней энергии, энтальпии и скорости звука в потоке соответственно:

$$U_a = C_{v,a} T_a; \quad i_a = C_{p,a} T_a; \quad a_a = \sqrt{k_a R_a T_a};$$

где  $\rho_a$ ,  $W_a$ ,  $l_a$  - плотность, скорость и удельная техническая работа рабочего тела.

2. Пассивное рабочее тело, представляющее собой смесь разнофазных компонентов, свойства которой изложены в [2]

Суммарный расход пассивного рабочего тела  $m_n$  состоит из расхода газообразного  $m_g$ , жидкого  $m_j$  и твердого (сыпучего)  $m_t$  компонентов. Надстрочные индексы "\*" и "\*\*\*" соответствуют конденсированному и парообразному состоянию жидкого компонента, соответственно.  $\varepsilon_i = m_i / m_n$  - массовая доля  $i$ -ого компонента смеси.

2.1 Основные константы и параметры состояния:  
удельные изобарная и изохорная теплоемкости, Дж/(кг\*К)

$$C_{p,n} = C_{p,z} \varepsilon_z + C_{j,c}^* \varepsilon_{j,c} + C_m \varepsilon_m;$$

$$C_{v,n} = C_{v,z} \varepsilon_z + C_{j,c}^* \varepsilon_{j,c} + C_m \varepsilon_m;$$

газовая постоянная, Дж/(кг\*К)

$$R_n = R_z \varepsilon_z;$$

показатель адиабаты

$$k_n = C_{p,n} / C_{v,n};$$

плотность, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_n = \frac{1}{\varepsilon_z / \rho_z + \varepsilon_{j,c} / \rho_{j,c}^* + \varepsilon_m / \rho_m}.$$

2.2 Основные уравнения:

уравнение состояния

$$P_n \left[ 1 - \rho_n (\varepsilon_{j,c} / \rho_{j,c}^* + \varepsilon_m / \rho_m) \right] = \rho_n R_n T_n;$$

уравнение адиабаты

$$P_n^0 / P_n = \left( T_n^0 / T_n \right)^{k_n / (k_n - 1)};$$

уравнение сохранения энергии

$$l_n = \frac{W_n^2}{2} = \frac{k_n}{k_n - 1} R_n T_n^0 \left[ 1 - \left( \frac{P_n}{P_n^0} \right)^{\frac{k_n - 1}{k_n}} \right] + (P_n^0 - P_n) \left( \frac{\varepsilon_{j,c}}{\rho_{j,c}^*} + \frac{\varepsilon_m}{\rho_m} \right);$$

уравнение Майера

$$R_n = C_{p,n} - C_{v,n} = C_{p,n} (k_n - 1) / k_n;$$

соотношения для внутренней энергии, энтальпии и скорости звука в потоке соответственно:

$$U_n = C_{v,n} T_n = U_z + U_{жс} + U_m;$$

$$i_n = C_{p,n} T_n + P_n \left( \varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^* + \varepsilon_m / \rho_m \right);$$

$$a_n = \frac{\sqrt{k_n R_n T_n}}{1 - \rho_n \left( \varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^* + \varepsilon_m / \rho_m \right)} = \frac{P_n}{\rho_n} \sqrt{\frac{k_n}{R_n T_n}}.$$

### 3. Рабочее тело в камере смешения (смесь активного и пассивного рабочих тел)

$\gamma = m_n / m_a$  - коэффициент эжекции.

3.1 Основные константы и параметры состояния:  
удельные изобарная и изохорная теплоемкости, Дж/(кг\*К)

$$C_{p,cm} = \left[ C_{p,a} + \gamma \left( C_{p,z} \varepsilon_z + C_{p,жс}^{**} \varepsilon_{жс} + C_m \varepsilon_m \right) \right] / (\gamma + 1);$$

$$C_{v,cm} = \left[ C_{v,a} + \gamma \left( C_{v,z} \varepsilon_z + C_{v,жс}^{**} \varepsilon_{жс} + C_m \varepsilon_m \right) \right] / (\gamma + 1);$$

газовая постоянная, Дж/(кг\*К)

$$R_{cm} = \left[ R_a + \gamma \left( R_z \varepsilon_z + R_{жс}^{**} \varepsilon_{жс} \right) \right] / (\gamma + 1);$$

показатель адиабаты

$$k_{cm} = C_{p,cm} / C_{v,cm};$$

плотность, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{cm} = \frac{(\gamma + 1)}{1 / \rho_a + \gamma \left( \varepsilon_z / \rho_z + \varepsilon_{жс} / \rho_{жс}^{**} + \varepsilon_m / \rho_m \right)}.$$

### 3.2 Основные уравнения:

уравнение состояния

$$P_{cm} \left[ 1 - \frac{\gamma P_{cm}}{(\gamma + 1) \rho_m} \frac{\varepsilon_m}{\rho_m} \right] = \rho_{cm} R_{cm} T_{cm};$$

уравнение адиабаты

$$P_{cm}^0 / P_{cm} = \left( T_{cm}^0 / T_{cm} \right)^{k_{cm} / (k_{cm} - 1)};$$

уравнение сохранения энергии

$$l_{cm} = \frac{W_{cm}^2}{2} = \frac{k_{cm}}{k_{cm} - 1} R_{cm} T_{cm}^0 \left[ 1 - \left( \frac{P_{cm}}{P_{cm}^0} \right)^{\frac{k_{cm} - 1}{k_{cm}}} \right] + (P_{cm}^0 - P_{cm}) \frac{\gamma}{(\gamma + 1)} \frac{\varepsilon_m}{\rho_m};$$

уравнение Майера

$$R_{cm} = C_{p,cm} - C_{v,cm} = C_{p,cm} (k_{cm} - 1) / k_{cm};$$

соотношения для внутренней энергии, энтальпии и скорости звука в потоке соответственно:

$$U_{cm} = C_{v,cm} T_{cm} = (U_e + \gamma U_n) / (\gamma + 1);$$

$$i_{cm} = C_{p,cm} T_{cm} + P_{cm} \gamma \varepsilon_m / [(\gamma + 1) \rho_m];$$

$$a_{cm} = \frac{\sqrt{k_{cm} R_{cm} T_{cm}}}{1 - \rho_{cm} \gamma \varepsilon_m / [(\gamma + 1) \rho_m]} = \frac{P_{cm}}{\rho_{cm}} \sqrt{\frac{k_{cm}}{R_{cm} T_{cm}}}.$$

#### 4. Уравнения эжекции

4.1 Уравнение сохранения энергии (в форме, удобной для определения  $T_{cm0}$ )

$$T_{cm}^0 = \frac{C_{p,a} T_a^0 + \gamma \left\{ C_{p,n} T_n^0 - [\varepsilon_{ж} r_{ж} + (P_{cm}^0 - P_n^0) \varepsilon_m / \rho_m - P_n^0 \varepsilon_{ж} / \rho_{ж}^*] \right\}}{C_{p,cm} (\gamma + 1)},$$

где  $r_{ж}$  - удельная теплота кипения жидкости при давлении смесеобразования.

4.2 Уравнение сохранения импульса

$$W_{cm} = (W_e + \gamma W_n) / (\gamma + 1);$$

или с учетом вязких потерь в газодинамическом тракте

$$l_{cm} = (\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \sqrt{l_a} + \gamma \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \sqrt{l_n})^2 / (\gamma + 1)^2;$$

где  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  коэффициенты потерь скорости рабочего тела в активном сопле, камере смешения, выходном диффузоре и пассивном сопле струйного аппарата, соответственно.

Предложенная модель рабочего процесса многофазного струйного аппарата позволит определить режимные параметры течения рабочего тела и геометрические характеристики газодинамического тракта по заданным эксплуатационным параметрам технологической установки.

#### Список литературы

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Том 1. Методы расчета / Алемасов В.Е. и др. Под ред. Глушко В.П. - М.: - ВИНТИ - 266 с.
2. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения. Сб. "Лопаточные машины и струйные аппараты". Вып. 5. - М.: Машиностроение, 1971. - с. 175 - 261.